

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛАНЦЮГІВ МАРКОВА

В. М. Рябенський, проф., д-р техн. наук;
О. О. Ушкаренко, доц., канд. техн. наук;
Аль-Суод Махмуд Мохаммад, асп.

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Розглянуто особливості використання марковських ланцюгів для аналізу та моделювання режимів роботи автономної електроенергетичної системи. На основі аналізу отримано часові діаграми зміни станів енергосистеми та діаграми роботи споживачів, які дозволяють визначити параметри процесу комутації навантаження.

Ключові слова: марковська мережа, дизель-генератор, електростанція, граф станів.

Аннотация. Рассмотрены особенности использования цепей Маркова для анализа и моделирования режимов работы автономной электроэнергетической системы. На основе анализа получены временные диаграммы изменения состояний энергосистемы и диаграммы работы потребителей, которые позволяют определить параметры процесса коммутации нагрузки.

Ключевые слова: марковская сеть, дизель-генератор, электростанция, граф состояний.

Abstract. The characteristics of Markov chains for analysis and modeling of the autonomous power system modes are considered. The timing charts of power system state and user force-displacement diagram, determining load commutation process parameters, are got on the basis of the analysis.

Keywords: Markov chain, diesel generator, power plant, state graph.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Автономна електроенергетична система (АЕЕС) у кожний момент часу може знаходитися в одному з декількох станів, що визначаються кількістю паралельно працюючих генераторів. Зміна режиму роботи енергосистеми обумовлена комутацією споживачів електроенергії. За наявності дефіциту потужності до загальної мережі підключається додатковий генератор, а при надлишку потужності, що генерується, відбувається відключення генератора з паралельної

роботи на загальну шину. Принциповим аспектом роботи автономної електроенергетичної системи є випадковий характер вхідного потоку заявок на комутацію навантаження. Тому *актуальною* є задача розробки алгоритму генерації випадкових значень з різними законами розподілу для моделювання процесів комутації навантаження та зміни станів енергосистеми. Для розв'язання задач моделювання в системах, де зміна станів є випадковим процесом, можуть бути використані ланцюги Маркова [1, 2].

МЕТОЮ СТАТТІ є аналіз роботи і моделювання електроенергетичної системи з декількома генераторами за допомогою ланцюгів Маркова для отримання діаграми зміни станів електроенергетичної системи та розробка алгоритму генерації випадкових значень для моделювання процесів комутації навантаження.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Основна властивість ланцюга Маркова полягає в тому, що стан, в якому система опиниться в наступний момент часу, залежить тільки від поточного стану і не залежить від попередніх [2]. Кожному моменту часу відповідає вектор станів $[S(t)]$, елементами якого є ймовірності знаходження системи в кожному з можливих станів:

$$[S(t_k)] = [S_1(t_k), S_2(t_k), \dots, S_n(t_k)];$$

$$\sum_{i=1}^n S_i(t_k) = 1,$$

де n — кількість генераторів в АЕЕС.

Тривалість знаходження системи у певному стані на порядок перевищує час, протягом якого система перейшла з одного стану в інший. Тому будемо вважати переходи системи з одного стану в інший такими, що відбуваються миттєво.

Розглянемо енергосистему, що складається з двох генераторів та певної кількості споживачів. За наявності достатньої кількості резерву потужності (в цьому режимі увімкнені не всі споживачі) на навантаження працює лише один генератор, а другий знаходиться в резерві. При нестачі потужності, що генерується, другий генератор уводиться на паралельну роботу з першим генератором і бере на себе частину навантаження [3]. Спрощена схема та граф станів такого енергоблока наведені на рис. 1.

Така схема роботи може використовуватись у тих випадках, коли три-

валість вмикання в роботу додаткового генератора невелика і його можна тримати у вимкненому стані. Для стаціонарних потоків заявок на комутацію навантаження можна записати:

$$\begin{cases} -\lambda P_0 + \mu P_1 = 0, \\ -(\lambda + \mu)P_1 + \lambda P_0 + 2\mu P_2 = 0, \\ P_0 + P_1 + P_2 = 1. \end{cases}$$

Розв'язком цієї системи рівнянь є

$$P_0 = \frac{2}{\left(1 + \frac{\lambda}{\mu}\right)^2 + 1}; \quad P_1 = \frac{\lambda P_0}{\mu}; \quad P_2 = P_0 + P_1.$$

Для режиму, коли обидва генератори працюють, ймовірності станів визначаються виразами:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2}; \quad P_1 = \frac{2\lambda P_0}{\mu}.$$

Для енергосистеми, що складається з трьох генераторів, два з яких знаходяться в роботі, а один — у резерві (ненавантажений), ймовірності станів можна визначити наступним чином:

$$P_0 = \frac{3}{2\left(1 + \frac{\lambda}{\mu}\right)^3 + 1}; \quad P_1 = \frac{2\lambda P_0}{\mu}; \quad P_2 = \frac{\lambda P_1}{\mu}.$$

Для побудови моделі енергосистеми, що складається з трьох синхронних генераторів, використовується апарат марковських процесів. Енергосистема в будь-який момент часу може знаходитися в одному з п'яти станів: S_0 — вимкнені всі генератори; S_1 — працює перший генератор, другий — в гарячому резерві; S_2 — працює перший та другий генератори, третій знаходиться в резерві; S_3 — всі три генератори працюють. На рис. 2 наведена часова діаграма, яка показує стан кожного з генераторів протягом доби. Генератор як елемент системи може бути описаний булевою функцією, що має два значення — 0 (вимкнений) та 1 (увімкнений). Потужність кожного з генераторів складає 300 кВт.

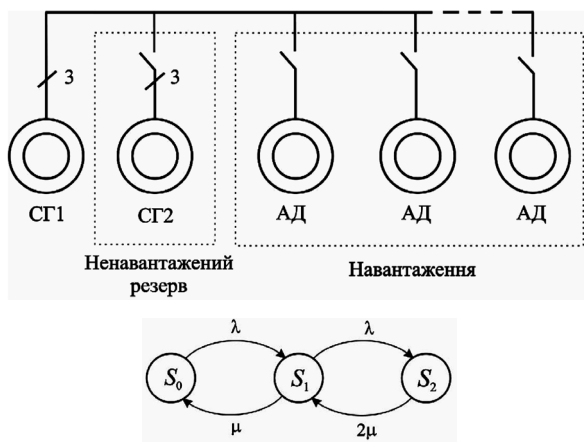


Рис. 1. Спрощена схема енергосистеми

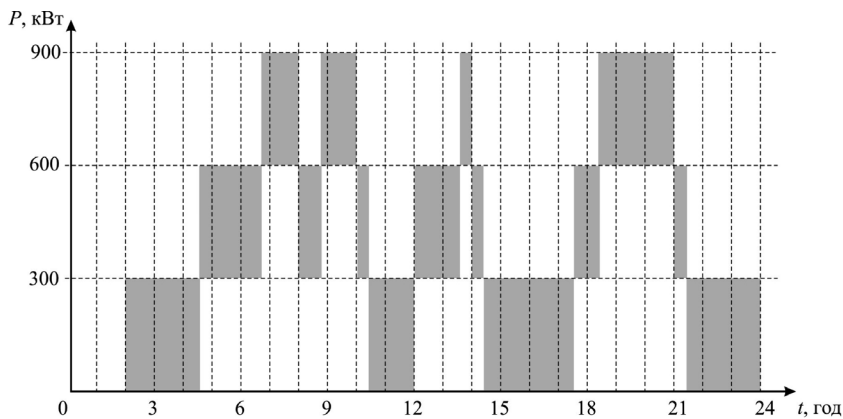


Рис. 2. Діаграма роботи генераторів протягом доби

У кожній з даних областей значення споживаної потужності визначається кількістю навантаження, що підключене до шини головного розподільного щита, і є випадковою величиною y — функцією $y = f(\alpha, \beta, \dots, \omega)$ випадкових величин $\alpha, \beta, \dots, \omega$ з відомими законами розподілу, які визначаються шляхом аналізу діаграми навантаження в попередні моменти часу.

Виконаємо імітаційне моделювання поведінки дискретного ланцюга Маркова. Початковий стан системи заданий. Рядок матриці ймовірностей переходів для цього стану встановлює ймовірності

сті переходів з поточного стану в будь-який інший. Новий стан отримаємо як дискретне випадкове значення:

$$|p| = \begin{vmatrix} S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ 0,1 & 0,9 & 0 & 0 \\ 0,05 & 0,7 & 0,25 & 0 \\ 0 & 0,6 & 0,3 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0,8 & 0,2 \end{vmatrix}.$$

Розглянемо рядок матриці переходів, якому відповідає стан АЕЕС з одним працюючим генератором. Імовірність того, що система залишиться в цьому ж стані дорівнює 0,7. Імовірність підключення другого генератора на паралельну

роботу дорівнює 0,25. Імовірність зупинки генератора дорівнює 0,05. Генерується випадкове значення ξ . Припустимо, що воно дорівнює 0,473. Це означає, що система із стану S_0 перейде в стан S_1 , тобто був увімкнений один генератор. Генерується наступне випадкове значення, наприклад 0,831. Це означає, що система перейде в стан S_2 , тобто буде увімкнений другий генератор на паралельну роботу з першим. Нове випадкове значення дорівнює 0,936, і система залишається в стані S_2 (з двома паралельно працюючими генераторами). Цей алгоритм продовжується доти, доки не буде отримано стани, в яких може знаходитися АЕЕС протягом доби. Необхідно виконати $6 \cdot 24 = 144$ ітерації за умови, що крок дискретного часу складає 10 хв.

Кожен споживач характеризується своєю діаграмою роботи, яка є незалежною від режимів роботи інших споживачів. Розглянуті споживачі характе-

ризуються індивідуальними режимами роботи, і процес їх комутації носить випадковий характер. На рис. 3 наведено діаграми роботи кожного із споживачів електроенергії, а на рис. 4 — потік заявок на комутацію навантаження.

Від одночасної роботи великої кількості споживачів електроенергії в експлуатаційних режимах з різним характером навантаження залежить сумарне навантаження АЕЕС. Визначення сумарних різко змінюваних навантажень слід проводити на підставі індивідуальних графіків навантажень окремих споживачів з урахуванням їх розбіжності [4]. У добовому графіку навантаження АЕЕС є піки, обумовлені вмиканням і вимиканням навантажень в експлуатаційних режимах роботи електростанції, виявлення яких необхідне для запобігання несприятливим умовам роботи електроприймачів.

Блок-схема алгоритму, який дозволяє отримати один із зазначених розподілів, наведена на рис. 5.

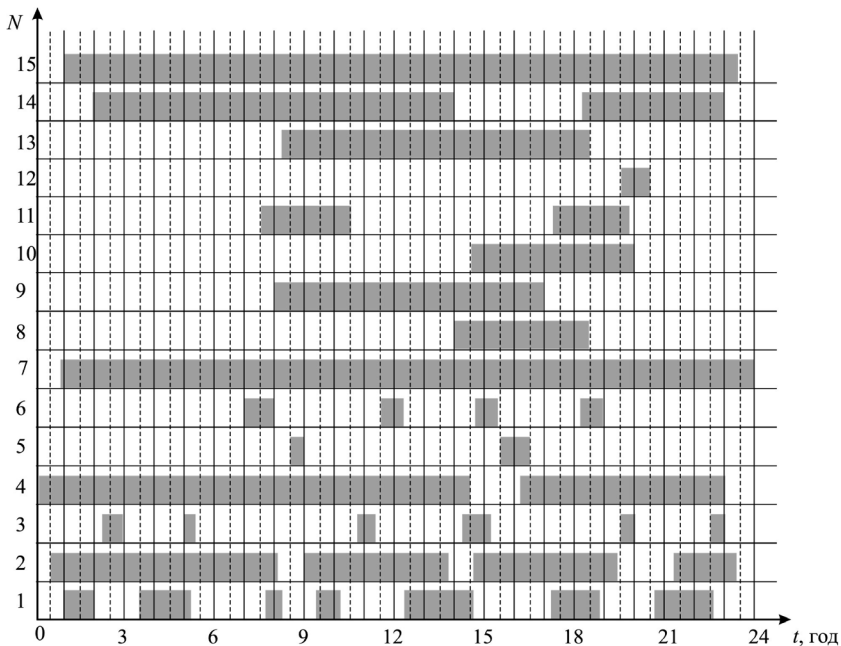


Рис. 3. Діаграма роботи кожного із споживачів

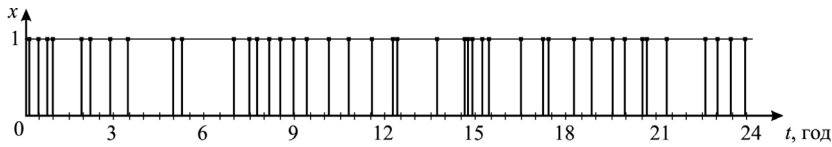


Рис. 4. Потік заявок на комутацію навантаження

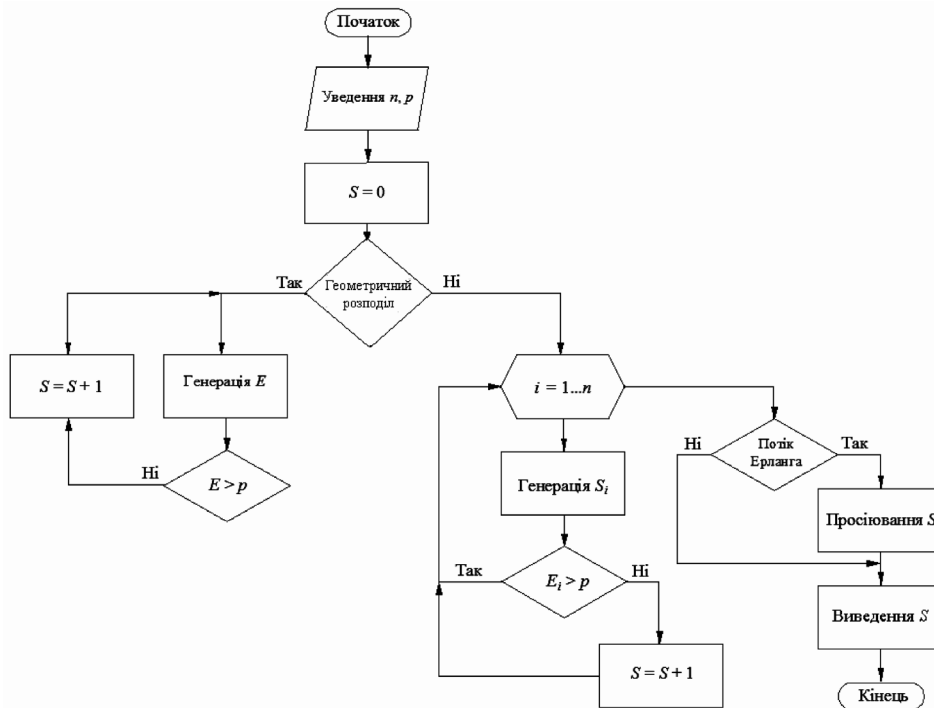


Рис. 5. Блок-схема алгоритму генерації випадкових значень для різних законів розподілів

У розглянутому випадку зміна стану системи відбувається шляхом вмикання або вимикання лише одного генератора, тобто, наприклад, якщо працюють два генератори, то система може перейти або в стан з одним працюючим генератором, або в стан з трьома паралельно працюючими генераторами. Однак аналіз програми навантаження показує, що у випадку роботи одного генератора при запуску споживачів можлива ситуація, коли сумарна потужність споживачів, що підключаються, буде більшою за сумарну потужність двох генераторів. Тому система зі стану з одним працюючим генератором у K -момент може перейти

в стан з трьома працюючими генераторами в $(K+1)$ -момент і навпаки, аналогічно ситуація можлива і для стану, коли жоден з генераторів не працює, однак для забезпечення споживачів електроенергією необхідна робота відразу двох генераторів (перехід з Q_0 в Q_2).

На рис. 6 позначено: Q_0 — жоден з генераторів не працює, сумарна потужність споживачів дорівнює 0; Q_1 — працює один генератор, сумарна потужність споживачів не більше 250 кВт; Q_2 — працюють два генератори, сумарна потужність споживачів не більше 500 кВт; Q_3 — працюють три генератори, сумарна потужність споживачів не більше

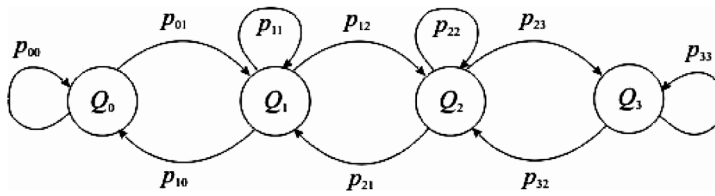


Рис. 6. Граф станів системи з одним генератором

750 кВт; $\{Q_0, Q_1, Q_2, Q_3\}$ — можливі стани системи.

У загальному вигляді матриця перехідних імовірностей записується як

$$|P_{ij}| = \begin{vmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} & P_{03} \\ P_{10} & P_{21} & P_{31} & P_{13} \\ P_{20} & P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{30} & P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{vmatrix},$$

$$\sum_{j=0}^n p_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, n}.$$

Крім того, ланцюг Маркова характеризується вектором імовірностей станів

$$S(t) = \{S_0(t), S_1(t), S_2(t), S_3(t)\},$$

який показує ймовірність $S_i(t)$ знаходження системи в стані Q_i :

$$\sum_{i=1}^n S_i(t) = 1.$$

Для автономної електроенергетичної системи, що складається з трьох генераторів, матриця перехідних імовірностей має вигляд

$$|P_{ij}| = \begin{vmatrix} 0,05 & 0,95 & 0 & 0 \\ 0,1 & 0,7 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0,6 & 0,3 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0,9 & 0,1 \end{vmatrix}.$$

Рівняння для визначення стаціонарних імовірностей має вигляд

$$\begin{cases} S_0 = p_{00}S_0 + p_{10}S_1; \\ S_1 = p_{01}S_0 + p_{11}S_1 + p_{21}S_2; \\ S_2 = p_{12}S_1 + p_{22}S_2 + p_{32}S_3; \\ S_3 = p_{23}S_2 + p_{33}S_3. \end{cases}$$

Для встановленого режиму складемо систему рівнянь

$$\begin{cases} S_0 = 0,05S_0 + 0,1S_1; \\ S_1 = 0,95S_0 + 0,7S_1 + 0,6S_2; \\ S_2 = 0,2S_1 + 0,3S_2 + 0,9S_3; \\ S_3 = 0,1S_2 + 0,1S_3. \end{cases}$$

Розв'язання цієї системи рівнянь дозволяє визначити ймовірності знаходження АЕЕС у кожному зі станів. На рис. 7 наведено граф станів системи для випадку, коли одночасно (у разі дефіциту потужності для живлення споживачів) можуть бути включені в роботу не один, а два генератори.

Для такого випадку система рівнянь стаціонарних імовірностей матиме вигляд

$$\begin{cases} S_0 = p_{00}S_0 + p_{10}S_1 + p_{20}S_3; \\ S_1 = p_{01}S_0 + p_{11}S_1 + p_{21}S_2 + p_{31}S_3; \\ S_2 = p_{02}S_0 + p_{12}S_1 + p_{22}S_2 + p_{32}S_3; \\ S_3 = p_{13}S_1 + p_{23}S_2 + p_{33}S_3. \end{cases}$$

Матриця перехідних імовірностей матиме вигляд

$$|P_{ij}| = \begin{vmatrix} 0,05 & 0,9 & 0,05 & 0 \\ 0,1 & 0,6 & 0,2 & 0 \\ 0,05 & 0,6 & 0,25 & 0,1 \\ 0 & 0,2 & 0,7 & 0,1 \end{vmatrix}.$$

Розв'язання системи рівнянь дає значення стаціонарних імовірностей знаходження енергосистеми в кожному із станів.

ВИСНОВКИ

У результаті дослідження розроблені моделі марковських процесів, які подані у вигляді графів та описують процеси зміни станів АЕЕС. З використанням

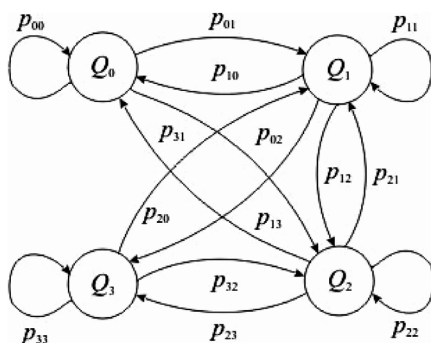


Рис. 7. Граф станів системи з двома генераторами

методу статистичного моделювання проімітовано роботу АЕЕС з трьома генераторами. Отримана часова діаграма показує, яким чином відбувається процес зміни стану енергосистеми. Розроблений алгоритм генерації випадкових значень для різних законів розподілів дозволив виконати моделювання процесів комутації навантаження та отримати індивідуальні діаграми роботи споживачів. З використанням діаграми комутації навантаження є можливість визначити такі параметри, як частота сплесків

потужності, середня кількість сплесків за заданий інтервал часу, імовірність появи сплеску. Ці параметри можуть бути визначені за допомогою раніше розроблених алгоритмів та програмних засобів [5]. Знання даних параметрів дозволить визначити параметри кореляційної функції, яка в подальшому може бути використана як характеристика збурюючої дії в системах стабілізації напруги, що відкриває можливості для розв'язання задачі усунення імпульсних випадкових завад.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Бабков, С.П.** Моделирование систем [Текст] : учеб. пособие / С.П. Бабков, Д.О. Бытев / Иван. гос. хим.-технол. ун-т. — Иваново, 2008. — 156 с.
- [2] **Бородюк, В.П.** Дискретные цепи Маркова в задачах оптимизации технических систем [Текст] / В.П. Бородюк, Ю.Е. Голяс. — М. : Моск. энерг. ин-т, 1989. — 76 с.
- [3] **Дубицкий, М.А.** Выбор и использование резервов генерирующей мощности в электроэнергетических системах [Текст] / М.А. Дубицкий, Ю.Н. Руденко, М.Б. Чельцов. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 272 с.
- [4] **Орнов, В.Г.** Задачи оперативного и автоматического управления энергосистемами [Текст] / В.Г. Орнов, М.А. Рабинович. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 223 с.
- [5] **Рябенский, В.М.** Методика статистичного дослідження сплесків потужності в автономних електростанціях [Текст] / В.М. Рябенский, О.О. Ушкаренко, Нгуен Ван Тхань // 36. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2009. — № 6 (429). — С. 135–141.